انتشار مولکولی یون کلر در سنگ مارن و ماسه‌سنگ*

(یادداشت پژوهشی)

کاظم بدو[۱] یاشار داوری‌اصل[۲]

چکیده *انتشار مولکولی یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های انتشار آلودگی در خاک و سنگ می‌باشد. در این تحقیق ضریب انتشار مولکولی یون کلر در ماسه‌سنگ و سنگ مارن منطقهٔ دفن زبالهٔ ارومیه با استفاده از روش برازش نمودارهای حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی با نتایج نظری تعیین گردید. نمونه‌های سنگ مارن و ماسه‌سنگ به‌ترتیب تحت شرایط انتشار مولکولی «از میان سنگ» و «به داخل سنگ» قرار گرفتند و غلظت‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری شدند. برای انجام محاسبات نظری از نرم‌افزار Pollute استفاده گردید. ضرایب انتشار مولکولی متوسط نتیجه شده برای سنگ مارن و ماسه‌سنگ به‌ترتیب $۲/۴۸\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) و $۲/۵۵\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) بودند که نشان‌دهندهٔ نزدیک بودن مقادیر این پارامتر در هر دو سنگ به‌دلیل معادل بودن اثر پارامترهای فیزیکی آنها مانند پوکی و دانسیته بود. تطابق خوب نتایج مشاهده‌ای آزمایشگاهی و مدل نظری، صحت روش‌های آزمایشگاهی و مدل نظری استفاده شده را تأیید کرد. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در انتشار مولکولی در سنگ‌های مدل شده نشان داد که پارامترهای زمان و ضریب انتشار مولکولی اثر بیشتری در تغییر غلظت یون کلر در انتهای مسیر حرکت از میان سنگ دارد. نتایج بدست آمده در این مطالعه برای محاسبات انتقال آلودگی در طراحی مدفن‌های مواد زائد جامد مستقر در نهشته‌های سنگی می‌توان استفاده کرد.*

واژه‌های کلیدی انتشار مولکولی؛ ماسه سنگ؛ سنگ مارن؛ مدل آزمایشگاهی؛ یون کلر؛ Pollute.

Molecular Diffusion of Chloride Ion through Marl Stone and Sand Stone

K. Badv Y. Davari Asl

Abstract *Molecular diffusion is one of the important contaminant transport mechanisms through soil and rocks. In this study the molecular diffusion coefficient of marl stone and sand stone from the Urmia City landfill site was determined using the best fit method of the observed laboratory data and the predicted theoretical data. The marl stone and sand stone samples were tested under the conditions of "through diffusion" and "in diffusion", respectively, and the observed chloride concentrations were determined. The computer code of Pollute was used for theoretical calculations. The average diffusion coefficients of $2.48x10^{-10}$ (m^2/s) and $2.55x10^{-10}$ (m^2/s) were obtained for marl stone and sand stone, respectively, which show the similarity of this parameter in both samples due to the compatibility of the effect of physical parameters of the samples such as porosity and density. The results of the sensitivity analysis of the affecting parameters in molecular diffusion in modeled stones showed that the parameters of time and diffusion coefficient have more effect on the concentration of chloride ion at the end of the migration path through stone. The good agreement between the data of the experimental and theoretical models shows the accuracy of the adopted experimental methods and theoretical model. The results of this study could be used in contaminant transport calculations in the design of solid waste landfills situated on bed rocks.*

Keywords Diffusion; Marl stone; Sand stone; Experimental model; Chloride; Pollute.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی خاک و پی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه.

مقدمه

شیرابهٔ تولید شده از انواع مواد زائد جامد و استفاده وسیع از سموم و کودهای شیمیایی آلاینده‌های زیادی را وارد محیط زیست می‌کند. این ترکیبات وارد بافت خاک می‌شود و سپس از طریق مکانیسم‌های انتقال آلودگی نظیر انتقال از طریق فرارفت (advection) و انتشار مولکولی (diffusion) در خاک منتشر می‌گردد و به سفره‌های آب زیرزمینی می‌رسد. وجود یک لایه با نفوذپذیری کم مانند رس یا سنگ بدون درز و ترک می‌تواند مانع از انتقال آلودگی به طریق فرارفت شود لیکن انتشار آلودگی به طریق انتشار مولکولی در این لایه‌ها عامل تعیین‌کننده در انتقال آلودگی می‌باشد[1, 2, 3]. بارون و همکاران[4] آزمایش‌های انتشار مولکولی معکوس را بر روی سنگ شیل انجام دادند. در مطالعات صورت گرفته سنگ‌های آلوده به یون کلر مورد آزمایش قرار گرفتند. آنها ضریب انتشار مولکولی یون کلر در سنگ شیل را (m^2/s) $۱/٤×۱۰^{-۱۰}$ تا (m^2/s) $۱/٦×۱۰^{-۱۰}$ به‌دست آوردند. در مطالعاتی دیگر بارون و همکاران [5] آزمایش‌های مشابهی را بر روی لای‌سنگ انجام دادند. در این آزمایش‌ها ضریب انتشار مولکولی یون کلر در لای‌سنگ (m^2/s) $۱/٥×۱۰^{-۱۰}$ تا (m^2/s) $۲×۱۰^{-۱۰}$ تعیین شد. کیو و همکاران [6] ضریب انتشار مولکولی یون ید را به طریق عکسبرداری با استفاده از اشعهٔ X برای سنگ‌های شیل و سنگ آهک تعیین کردند. در این آزمایش‌ها ضریب انتشار مولکولی یون ید در سنگ شیل در محدودهٔ (m^2/s) $۲×۱۰^{-۹}$ تا (m^2/s) $۹×۱۰^{-۹}$ و در سنگ آهک (m^2/s) $۱/٥×۱۰^{-۹}$ تا (m^2/s) $٤/٥×۱۰^{-۹}$ تعیین شد. هم‌چنین در این آزمایش‌ها ضرایب انتشار مولکولی به‌دست آمده برای سنگ‌ها با نتایج آزمایش‌های «انتشار مولکولی از میان سنگ» مقایسه شدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نتایج حاصل از دو روش با هم مطابقت خوبی دارند.

در زمینهٔ مطالعهٔ انتقال آلودگی به طریقهٔ فرارفت و انتشار مولکولی می‌توان به کارهای انجام یافته توسط بدو و همکاران [7,12] و رو و بدو [13] و کونکا و رایت [14] و گیلهام و چری [15] اشاره نمود.

برای انجام تحقیق حاضر در ابتدا از سنگ‌های منطقه‌ای واقع در دامنهٔ کوه‌های الله‌اکبر ارومیه نمونه‌برداری شد. پس از مطالعات زمین‌شناسی مشخص شد که در زیر لایهٔ سطحی خاک نباتی موجود در منطقه لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سنگ مارن وجود دارد. برای انجام آزمایش‌ها دو مدل آزمایشگاهی برای هر نوع از سنگ‌ها ساخته شد. پس از انجام آزمایش‌ها نمونه‌های سنگ در نرم افزار Pollute [17] به‌صورت ریاضی مدل‌سازی شده و نمودارهای حاصل از روش آزمایشگاهی با نمودارهای به‌دست آمده از نرم‌افزار مقایسه شدند. در نهایت ضریب انتشار مولکولی نمونه سنگ‌ها به روش برازش نمودار تعیین گردید.

خصوصیات زمین‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه

سنگ مارن یک کربنات کلسیم (Calcium Carbonate) یا لجن و لای غنی از آهک است که شامل مقادیر مختلفی از رس‌ها و آراگونیت (Aragonite) می‌باشد. مارن شامل ۳۵ تا ٦٥ درصد کربنات می باشد [17]. سنگ مارن از همان ترکیبی که خاک مارن را تشکیل داده به‌وجود می‌آید و تنها تفاوت آنها شرایطی است که در هنگام تشکیل سنگ مارن موجب سخت شدن آن می‌شود. در حقیقت سنگ مارن همان سنگ آهک ناخالص می‌باشد. این سنگ جزو سنگ‌های هوازده شونده می‌باشد و با قرار گرفتن در معرض شرایط جوی به‌سرعت هوازده می‌شود و به قطعات کوچک‌تر تقسیم می‌گردد. شکل (۱) هوازدگی سنگ مارن دارای برون‌زد در منطقه را نشان می‌دهد. زمان تشکیل مارن‌های منطقه به دورهٔ «میوسن» نسبت داده می‌شود [۱۸].



شکل ۱ هوازدگی سنگ مارن دارای برون‌زد در منطقه

کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ سنگ مارن مورد مطالعه توسط آزمایش XRD مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ سنگ مارن

کانی‌ها	درصد
کوارتز	٤٤/٤
کلسیت	۳٦
فلدسپار	۱۷
مسکویت	۱
سایرکانی‌های رسی	۱

مطابق جدول (۱) کانی های کوارتز و کلسیت به‌ترتیب بیشترین درصد کانی‌ها را در سنگ مارن تشکیل می‌دهند.

ماسه‌سنگ یک سنگ رسوبی است که از دانه‌های کوچک به‌هم چسبیده توسط مواد سیلیسی، فلدسپاری یا آهکی تشکیل شده است. این سنگ در مناطقی یافت می‌شود که در گذشته در آنها دریاچه‌های کوچکی وجود داشته است [۱۸] طبق شواهد تاریخی موجود در محل مورد مطالعه در گذشته دریاچه وجود داشته است. کانی‌های چسباننده در ماسه‌سنگ عموماً سیلیکا و کربنات کلسیم می‌باشند که معمولاً از تجزیه و تبدیل کانی‌های ماسه پس از مدفون شدن به‌وجود می‌آیند [19]. نتایج حاصل از آزمایش XRD برای ماسه‌سنگ مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ ماسه سنگ

کانی‌ها	درصد
کلسیت	۳۹/۹
کوارتز	۳٦/۷
فلدسپار	۲۲
سایر کانی‌های رسی	۲

مطابق جدول (۲) کانی‌های کلسیت و کوارتز به‌ترتیب بیشترین درصد کانی‌ها را در ماسه‌سنگ تشکیل می‌دهند. مقایسهٔ XRD در جداول (۱و۲) نشان می‌دهد که درصد کانی فلدسپار در ماسه‌سنگ قدری بیشتر از سنگ مارن است.

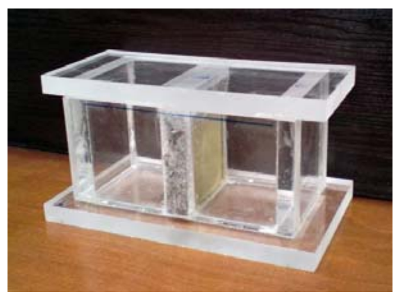
تهیهٔ مدل‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های سنگ

به‌دلیل عدم استحکام کافی و لایه‌لایه بودن ساختار سنگ مارن عمل مغزه‌گیری (Coring) با روش های معمولی از این سنگ امکان‌پذیر نیست و بر این اساس از روش تراش دادن (Trimming) سنگ استفاده شد. ماسه سنگ به‌علت ساختار مستحکم قابلیت مغزه‌گیری دارد و لذا نمونه‌ها بدین طریق تهیه شدند. با توجه به تفاوت روش آماده‌سازی هر یک از سنگ‌ها، آزمایش هر یک از نمونه‌ها نیاز به طراحی مدل ویژه‌ای داشته است.

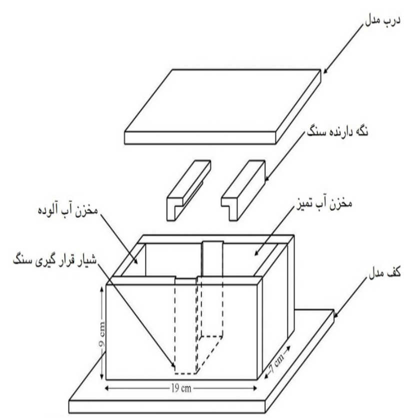
نمونه‌های سنگ پس از آماده شدن به مدت ٤٥ روز در آب مقطر نگهداری شدند تا علاوه بر اشباع شدن، آلودگی‌های احتمالی موجود در ساختمان آنها شسته گردد و غلظت یون پس‌زمینهٔ آنها کم شود.

تهیهٔ نمونه‌های سنگ مارن. برای آماده‌سازی نمونه سنگ مارن از روش تراش دادن استفاده شد. با توجه به محدودیت‌های این روش، آماده‌سازی نمونه‌ها به شکل چهارگوش دقت بیشتری نسبت به شکل دایروی داشت. لذا نمونه‌ها به شکل چهارگوش آماده شدند و بر مبنای انتشار مولکولی به‌طریق عبور یون از میان (Trough

Diffusion) سنگ [6] مورد آزمایش قرار گرفتند. نمای شماتیک مدل آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است. نمونه‌ها توسط دستگاه فرز با صفحهٔ الماسه به ابعاد ۸×۸ سانتی‌متر و با ضخامت ۲ سانتی‌متر تراش داده شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، مدل آزمایشگاهی از «پلکسی گلاس» ساخته شد. برای آب‌بندی بهتر در جداره و نیز کف مخزن شیارهایی با عمق ۵ و عرض ۲۲ میلی‌متر ایجاد گردید و نمونه‌سنگ توسط چسب سیلیکون در داخل مدل نصب شد. درنتیجه نمونه‌سنگ مخزن به دو قسمت مساوی تقسیم گردید که یکی مخزن آب تمیز و دیگری مخزن آب آلوده می‌باشد. شکل (۳) مدل آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد.

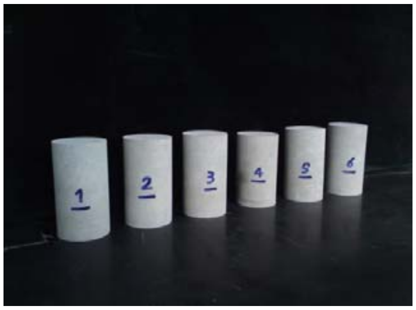


شکل ۲ شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی برای سنگ مارن

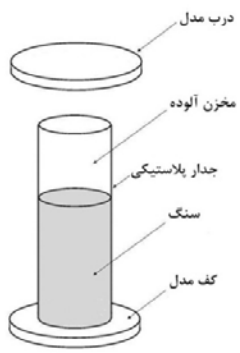


شکل ۳ مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده برای سنگ مارن

تهیهٔ نمونه‌های ماسه‌سنگ. با استفاده از مغزه‌گیر، نمونه‌های ماسه‌سنگ مطابق شکل (٤) به‌صورت استوانه‌های با قطر ٤۵ و طول ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شد و مدل ساخته‌شده برمبنای انتشار مولکولی مستقیم (به داخل سنگ) طراحی گردید [4]. تصویر شماتیک مدل در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ٤ نمونه‌های ماسه‌سنگ پس از مغزه‌گیری و برش



شکل ۵ شکل شماتیک مدل برای ماسه‌سنگ

نمونه‌های ماسه‌سنگ با استفاده از چسب سیلیکون مطابق شکل (٦) در داخل استوانه‌های پلاستیکی جاگذاری شدند.



شکل ٦ نمونهٔ ماسه‌سنگ در استوانهٔ پلاستیکی

روش انجام آزمایش‌ها

در آزمـــایش‌هـــا از محلـــول‌هـــای (mg/l) ٤۰۰۰ و (mg/l) ۳٦۰۰ یون کلر به‌عنوان محلول آلوده استفاده شد. یون کلر دارای سرعت انتشار نسبتاً بالا و جذب سطحی ناچیز است [20]. در آزمایش‌های سنگ مارن در یک سمت سنگ، آب مقطر و در سمت دیگر محلول آلوده تا بالای سنگ‌ها ریخته شد به‌طوری که سطح هر دو مخزن در یک تراز باشد (شکل ۳). در آزمایش‌های ماسه‌سنگ، محلول آلوده به ارتفاع ۸ سانتی‌متر در مخزن موجود در بالای سنگ‌ها ریخته شد (شکل ۵). در روزهای ابتدایی در هر روز ۲ میلی‌لیتر از مخازن نمونه‌برداری شده و حجم برداشته شده با آب مقطر جایگزین گردید. با پیشرفت آزمایش‌ها فاصلهٔ روزهای نمونه‌برداری بیشتر شد. انجام آزمایش‌ها ۳۰ روز ادامه یافت. پس از اتمام آزمایش‌ها نمونه‌های سنگ مارن برای تکرار آزمایش به‌مدت ۲۰ روز در داخل آب مقطر قرار داده شدند. نمونه‌های ماسه‌سنگ از داخل مدل‌ها بیرون آورده شدند و به ۷ لایهٔ نازک برش داده شدند تا پس از پودر شدن، غلظت یون کلر هر لایه به‌روش شستشویی و توسط دستگاه یون‌متر تعیین شود و پروفیل غلظت- عمق برای آنها رسم گردد. در مورد سنگ مارن به‌علت ضخامت کم نمونه امکان رسم پروفیل غلظت- عمق وجود نداشت. در ادامه غلظت محلول‌های نمونه‌برداری شده در طول مدت آزمایش تعیین شد و پروفیل‌های غلظت- زمان رسم شدند.

مدل‌سازی نظری

مدل‌سازی نظری نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Pollute انجام گرفت. نرم‌افزار با استفاده از داده‌های مربوط به هر آزمایش که شامل مشخصات فیزیکی، شیمیایی، هندسی و شرایط مرزی مدل‌ها بودند، نمودارهای غلظت- زمان (نمونه‌های سنگ مارن و ماسه‌سنگ) و غلظت- عمق (نمونه‌های سنگ مارن) را براساس قوانین فیک و به‌روش لایه محدود (Finite Layer Technique) پیش بینی کرد [16].

تحلیل نتایج و بحث

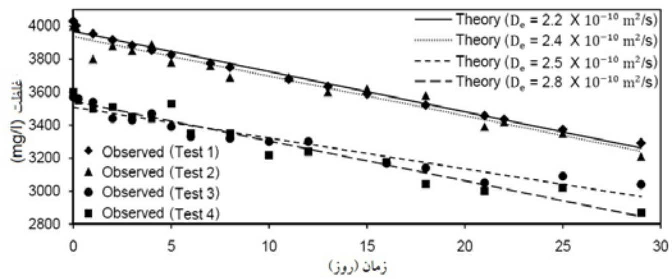
برای تعیین ضریب انتشار مولکولی یون کلر در نمونه‌سنگ‌های آزمایش شده، پس از مدل‌سازی نظری با Pollute، نمودارهای غلظت-زمان و غلظت-عمق درازای ضرایب انتشار مولکولی مختلف توسط نرم‌افزار رسم شدند. در هر آزمون هر یک از نمودارهای به‌دست آمده از نرم‌افزار با نمودارهای مشاهده‌ای به‌دست آمده از آزمایش مقایسه شدند و با تغییر ضریب انتشار مولکولی، آن ضریبی که بهترین برازش را بین نمودارهای مشاهده‌ای و نظری نتیجه داد به‌عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلر در آن نمونه‌سنگ انتخاب شد.

اشکال (۹-۷) به‌ترتیب نمودارهای غلظت- زمان برای سنگ مارن و ماسه‌سنگ و نمودار غلظت- عمق برای ماسه‌سنگ را که حاصل نتایج مشاهده‌ای و محاسبات نظری است نشان می‌دهند [۲۱، ۲۲]. ضرایب انتشار مولکولی به‌دست آمده برای نمونه‌سنگ‌های آزمایش شده در جدول (۳) نشان داده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده ضریب انتشار مولکولی یون کلر در سنگ مارن در محدودهٔ $۲/۲\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) الی $۲/۸\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) با میانگین $۲/٤۸\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) و ضریب انتشار مولکولی یون کلر در ماسه‌سنگ در محدوده $۲/٤\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) الی $۲/۷\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) با میانگین $۲/۵۵\times۱۰^{-۱۰}$ (m^2/s) به‌دست آمد. طبق این نتایج، ضرایب انتشار مولکولی نتیجه‌شده برای هر دو نمونه‌سنگ تقریباً یکسان است. پارامترهای پوکی و دانسیته خشک در ضریب انتشار مولکولی نقش تعیین‌کننده دارند، بدین معنی که با افزایش پوکی و کاهش دانسیته خشک سنگ، ضریب انتشار مولکولی عنصر شیمیایی در سنگ افزایش می‌یابد. پوکی متوسط سنگ مارن و ماسه‌سنگ به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ و دانسیته خشک آنها به‌ترتیب (g/cm^3)۲/٦۵ و (g/cm^3) ۲/۰ می‌باشد. پوکی مارن کمتر از ماسه‌سنگ و لیکن دانسیته خشک مارن بیشتر از ماسه‌سنگ است و این دو پارامتر به نوعی تأثیر همدیگر را در ضریب انتشار مولکولی متعادل می‌کنند و موجب می‌شوند که ضریب انتشار

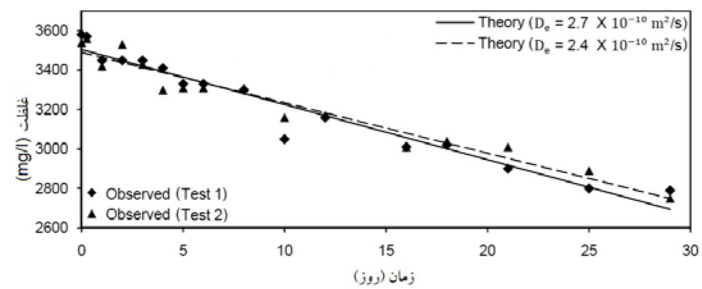
مولکولی یون کلر در این دو نمونه‌سنگ تقریباً یکسان باشد.

آنالیز حساسیت پارامترها

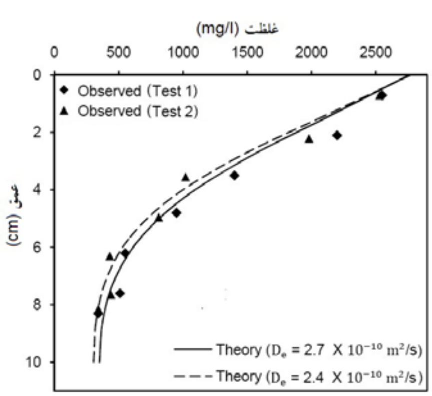
با توجه به این‌که پارامترهای متعددی در انتقال آلودگی به طریقهٔ انتشار مولکولی در سنگ دخیل می‌باشند و میزان تأثیر هر یک از آنها بر ضریب انتشار مولکولی متفاوت است، لذا باید در شرایط یکسان یکی از پارامترها تغییر داده شود و میزان تغییرات سنجیده شود. برای آنالیز حساسیت پارامترها در سنگ‌های مورد آزمایش در ابتدا مدل کامپیوتری هر یک از آزمایش‌ها در نرم‌افزار Pollute ساخته شد و سپس برای هر یک از مدل‌ها با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها تأثیر یک پارامتر بررسی گردید. در آنالیزهای انجام‌شده شرایط مشابه شرایط آزمایش مدل‌ها در آزمایشگاه می‌باشند؛ بدین صورت که آنالیزها برای سنگ مارن بر مبنای انتشار مولکولی از میان (مخازن آلوده و دریافت-کننده در طرفین سنگ) و برای ماسه‌سنگ برمبنای انتشار مولکولی به سنگ (مخزن آلوده در بالای نمونه‌سنگ) می‌باشد.



شکل ۷ پروفیل‌های غلظت- زمان سنگ مارن



شکل ۸ پروفیل های غلظت- زمان در ماسه‌سنگ



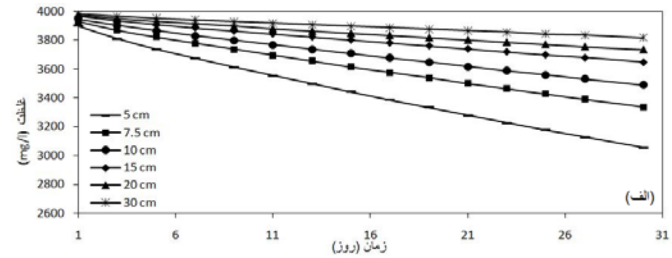
شکل ۹ پروفیل‌های غلظت- عمق در ماسه‌سنگ

جدول ۳ ضرایب انتشار مولکولی به‌دست آمده برای سنگ مارن و ماسه سنگ

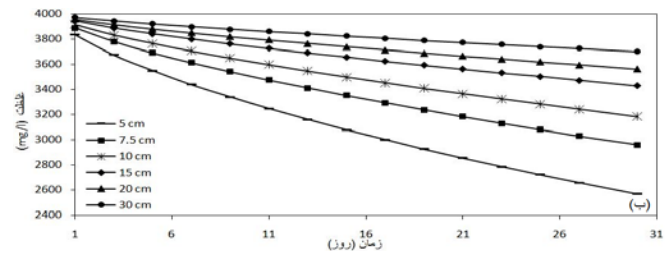
ضریب انتشار مولکولی (m^2/s)	غلظت یون کلر در مخزن آلوده (mg/l)	ارتفاع محلول کلرید سدیم (cm)	ابعاد نمونه‌سنگ (cm)			تخلخل سنگ (٪)	دانسیته خشک (gr/cm^3)	شمارهٔ آزمایش
			ارتفاع	عرض	طول			
$۲/۲\times۱۰^{-۱۰}$	٤۰۳۰	٦/٥	۲	۷	۷/٥	۰/۲۱	۲/۷	سنگ مارن- آزمایش ۱
$۲/٤\times۱۰^{-۱۰}$	٤۰۳۰	٦/٥	۱/۸	۷	۷/٥	۰/۱۹	۲/٦۲	سنگ مارن- آزمایش ۲
$۲/٥\times۱۰^{-۱۰}$	۳٦۰۰	٦/٥	۲	۷	۷/٥	۰/۲۱	۲/۷	سنگ مارن- آزمایش ۳
$۲/۸\times۱۰^{-۱۰}$	۳٦۰۰	٦/٥	۱/۸	۷	۷/٥	۰/۱۹	۲/٦۲	سنگ مارن- آزمایش ٤
$۲/۷\times۱۰^{-۱۰}$	۳٦۰۰	۸	۱۰	٥/٤	٥/٤	۰/۳۱	۲/۰۲	ماسه سنگ- آزمایش ۱
$۲/٤\times۱۰^{-۱۰}$	۳٦۰۰	۷/۸	۱۰	٥/٤	٥/٤	۰/۲۸	۲/۰٥	ماسه سنگ- آزمایش ۲

در آنالیزها برای سنگ مارن پارامترهای تخلخل برابر ۰/۲۱، ضخامت نمونه (cm) ۲، ارتفاع معادل شیرابه (cm) ٦/٥، ابعاد نمونه‌سنگ(cm)۷/٥×۷، غلظت پس‌زمینهٔ سنگ برابر (mg/l) ۲۰ و غلظت اولیهٔ منبع آلوده برابر (mg/l)٤۰۰۰ و برای ماسه‌سنگ تخلخل برابر ۰/۳، ارتفاع نمونه (cm)۱۰، ارتفاع معادل شیرابه (cm) ۸، غلظت پس‌زمینهٔ سنگ برابر (mg/l)۲۰ و غلظت اولیهٔ منبع آلوده برابر (mg/l) ٤۰۰۰ درنظر گرفته شده است. در آنالیز حساسیت صورت گرفته پارامترهای ارتفاع معادل شیرابه از(cm) ٥ تا (cm)۱۰، تخلخل از ۰/۱ تا ۰/٦، ضریب انتشار مولکولی از (m^2/s) $۰/٥\times۱۰^{-۱۰}$ تا (m^2/s) ۸×۱۰^{-۱۰} غلظت اولیهٔ منبع آلوده از (mg/l) ۱۰۰۰ تا (mg/l)۸۰۰۰ و زمان از ٥ تا ۳٦۰ روز تغییر داده شده‌اند. نمودارهای غلظت- زمان و غلظت- عمق حاصل از آنالیزها به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده‌اند.

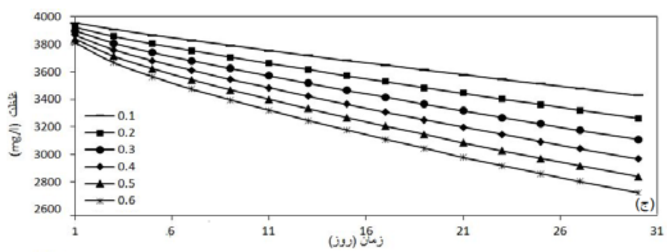
نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در جدول (٤) خلاصه شده است. در ستون آخر جدول (٤) میزان تأثیر پارامتر در غلظت یون کلر در انتهای نمونه‌سنگ مدل‌شده که انتهای مسیر انتشار مولکولی است، به‌صورت نسبی قید شده است. مطابق مقادیر نشان داده‌شده در این ستون جدول، محدودهٔ تأثیر در سنگ مارن از حدود یک برابر تا ۲٦ برابر و در ماسه‌سنگ از حدود یک برابر تا بسیار زیاد می‌باشد. مطابق نتایج نشان داده‌شده در این جدول پارامترهای زمان و ضریب انتشار مولکولی در هر دو نمونه‌سنگ تأثیر حساس‌تری نسبت به سایر پارامترها از خود نشان دادند.



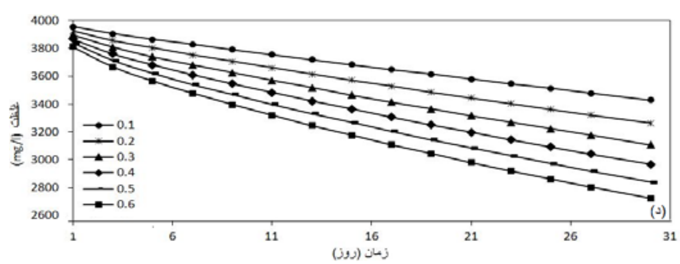
الف) تأثیر تغییر ارتفاع معادل شیرابه بر سنگ مارن



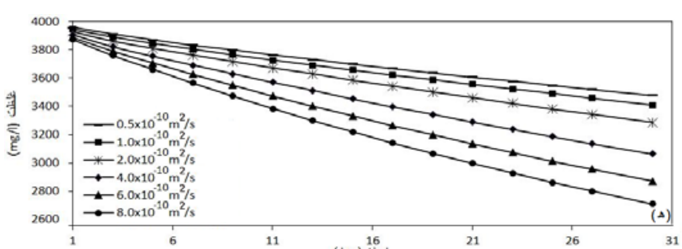
ب) تأثیر تغییر ارتفاع معادل شیرابه بر ماسه‌سنگ



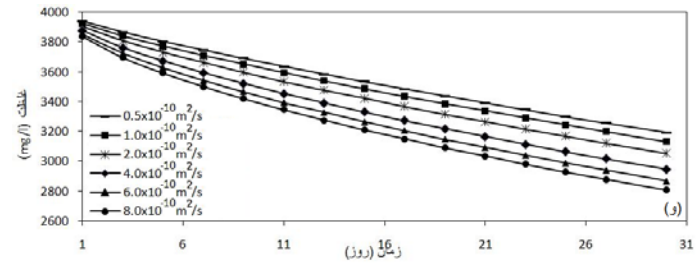
ج) تأثیر تغییر تخلخل بر سنگ مارن



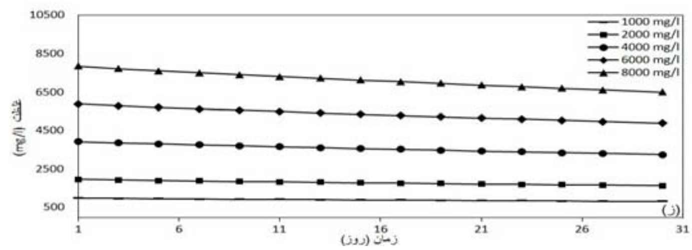
د) تأثیر تغییر تخلخل بر ماسه‌سنگ



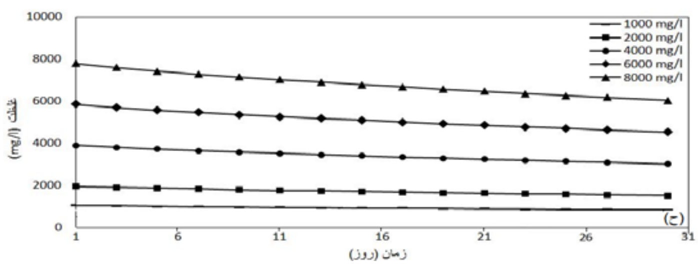
ه) تأثیر تغییر ضریب انتشار مولکولی بر سنگ مارن



و) تأثیر تغییر ضریب انتشار مولکولی بر ماسه‌سنگ



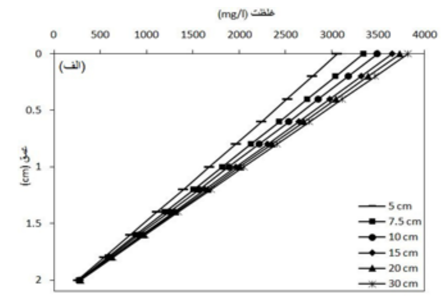
ز) تأثیر تغییر غلظت اولیهٔ شیرابه بر سنگ مارن



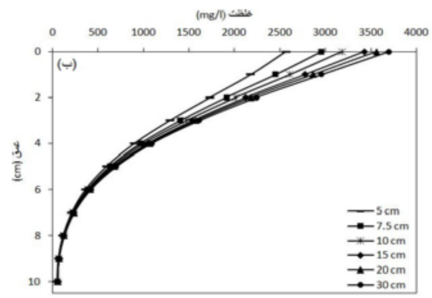
ح) تأثیر تغییر غلظت اولیه شیرابه بر ماسه‌سنگ

شکل ۱۰ پروفیل‌های غلظت- زمان حاصل از آنالیز حساسیت پارامترها

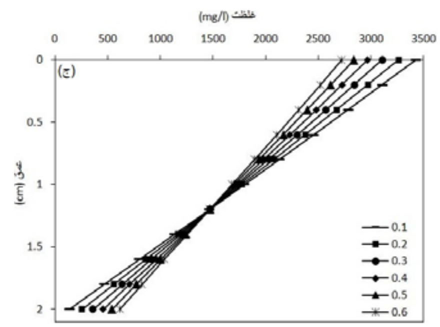
از مقایسه شکل های (الف) و (ب) ملاحظه می شود که کم شدن ارتفاع معادل شیرابه در ماسه سنگ در روزهای پایانی آزمایش باعث کاهش بیشتری در غلظت نسبت به سنگ مارن می شود زیرا با کاهش ارتفاع معادل شیرابه تعداد یون در ازای واحد سطح سنگ کاهش یافته و در اثر بالا بودن سرعت نفوذ یون ها به داخل بافت ماسه سنگ در مقایسه با سنگ مارن (بدلیل گرادیان غلظت بیشتر در ماسه سنگ) غلظت یون در محلول کاهش بیشتری دارد. از مقایسه شکل های (ج) و (د) مشاهده می شود که تغییر تخلخل تأثیر تقریبا یکسانی بر شکل نمودارهای غلظت-زمان دارد . مقایسه شکل های (ه) و (و) با هم نشان می‌دهد که افزایش ضریب انتشار مولکولی در روزهای پایانی آزمایش در سنگ مارن باعث تغییرات غلظت بیشتری نسبت به ماسه سنگ می شود زیرا به دلیل ضخامت کمتر، نمونه سنگ مارن نسبت به ماسه سنگ حساسیت بیشتری به تغییر ضریب انتشار مولکولی نشان می دهد. از مقایسه شکل های (ز) و (ح) مشاهده می شود که تغییر غلظت اولیه شیرابه در هر دو سنگ تأثیر یکسانی داشته و افزایش و کاهش آن نمودارها را به سمت بالا و پایین جابه جا می کند زیرا تغییر غلظت اولیه به صورت خطی تعداد یون موجود در ازای واحد سطح سنگ را تغییر می‌دهد و این امر سبب تغییر خطی در غلظت محلول‌ها می‌شود.



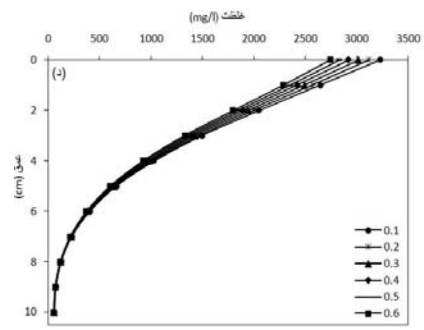
تأثیر تغییر ارتفاع معادل شیرابه بر سنگ مارن



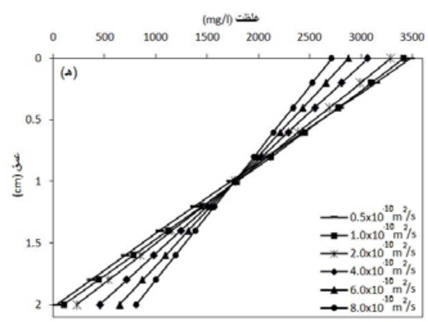
تأثیر تغییر ارتفاع معادل شیرابه بر ماسه سنگ



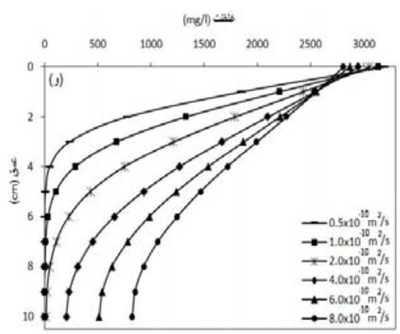
تأثیر تغییر تخلخل بر سنگ مارن



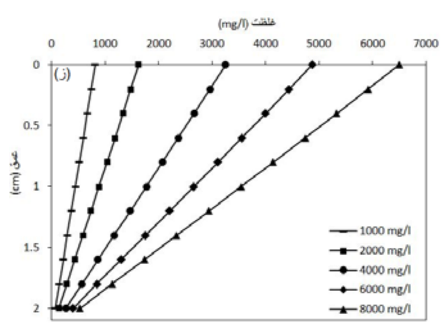
تأثیر تغییر تخلخل بر ماسه سنگ



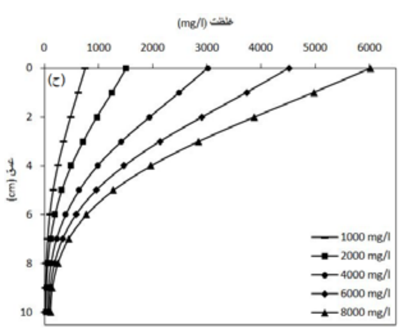
تأثیر تغییر ضریب انتشار مولکولی بر سنگ مارن



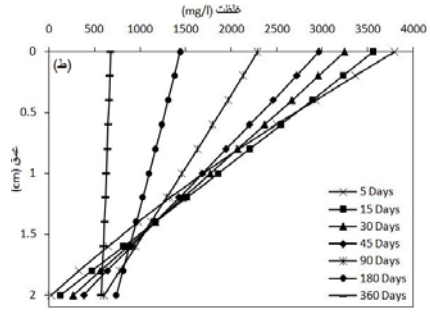
تأثیر تغییر ضریب انتشار مولکولی بر ماسه سنگ



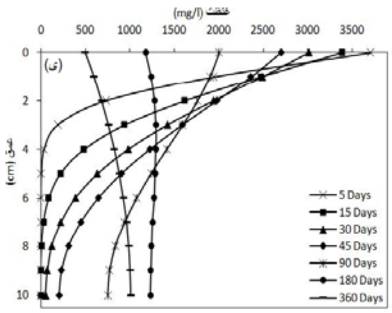
تأثیر تغییر غلظت اولیه شیرابه بر سنگ مارن



تأثیر تغییر غلظت اولیه شیرابه بر ماسه سنگ



تأثیر تغییر در زمان بر سنگ مارن



تأثیر تغییر در زمان بر ماسه سنگ

شکل ۱۱ پروفیل های غلظت- عمق حاصل از آنالیز حساسیت پارامترها

از مقایسه شکل های (الف) و (ب) مشاهده می شود که در ماسه سنگ غلظت در عمیق ترین نقطه به صفر می رسد ولی در مورد مارن این غلظت در حدود (mg/l) ۲۵۰ می باشد این رفتار سنگ مارن به دلیل افزایش آلودگی در مخزن حاوی آب مقطر می‌باشد ولی در ماسه سنگ به دلیل عدم نفوذ کامل آلودگی غلظت در اعماق بیشتر صفر می باشد. از مقایسه شکل های (ج) و (د) ملاحظه می شود که در سنگ مارن در تخلخل زیادتر غلظت در اعماق نسبت به تخلخل کمتر حالت افزایشی داشته ولی در ماسه سنگ در سطح غلظت کاهش پیدا می کند، علت این است که در سنگ مارن توده آلودگی از میان سنگ نفوذ کرده و به سمت دیگر می‌رسد و افزایش تخلخل سرعت حرکت توده را افزایش می‌دهد ولی در مورد ماسه سنگ با نفوذ توده آلودگی غلظت در سطح کاهش می‌یابد و افزایش تخلخل باعث کاهش بیشتر آن در سطح سنگ می‌شود. از مقایسه شکل‌های (ه) و (و) مشاهده می‌شود که افزایش ضریب انتشار مولکولی باعث افزایش غلظت در اعماق هر دو سنگ شده است، علت این است که در هر دو سنگ افزایش ضریب دیفیوژن باعث افزایش یافتن سرعت حرکت توده آلودگی در بافت سنگ‌ها و در نتیجه افزایش غلظت در اعماق بیشتر می‌شود. از مقایسه شکل (ز) و (ح) مشاهده می‌شود که میزان تأثیر تغییر غلظت اولیه شیرابه بر هر دو سنگ تقریبا یکسان است. از بررسی شکل (ط) مشاهده می‌شود که بعد از گذشت مدت زمان ۳٦۰ روز غلظت در سطح و عمق تقریبا با هم برابرند زیرا غلظت در هر دو مخزن یکسان شده و در نتیجه گرادیان غلظت صفر شده و دیفیوژن متوقف شده است ولی در مورد ماسه سنگ مشاهده می‌شود که بعد از گذشت ۳٦۰ روز غلظت در سطح کمتر از عمق است زیرا در این مدت زمان توده آلودگی به داخل سنگ نفوذ کرده از آن عبور کرده است، همچنین از هر دو نمودار نتیجه می شود که پارامتر زمان بر میزان نفوذ آلودگی به عمق سنگ بسیار تأثیرگذار است.

با توجه به جدول (٤) مشاهده می شود که در هر دو سنگ تغییر پارامتر غلظت اولیه شیرابه تأثیر چندانی بر میزان تغییر در غلظت ندارد لیکن با تغییرات کم پارامترهای زمان و ضریب انتشار مولکولی مشاهده می شود غلظت ها چندین برابر می شوند لذا انتشار آلودگی نسبت به این پارامترها حساسیت بیشتری دارد.

جدول ٤- نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در مدل‌های سنگ مارن و ماسه سنگ

میزان تغییر در غلظت	میزان تغییر پارامتر	تغییرات غلظت در بیشترین عمق	محدوده تغییرات	پارامتر تغییر داده شده	
۱/۱۱ برابر	٦ برابر	۲۵۷ تا ۲۸۷	۵ تا ۳۰	ارتفاع معادل شیرابه	سنگ مارن
٤/۵۸ برابر	٦ برابر	۱۳٤ تا ٦۱٤	۰/۱ تا ۰/٦	تخلخل سنگ	
۲٦ برابر	۷۲ برابر	۲۲ تا ۵۷۲	۵ تا ۳٦۰	زمان	
۱۷/۹ برابر	۱٦ برابر	۳٦ تا ٦٤۵	۰/۵×۱۰$^{-۱۰}$ تا ۸/۰×۱۰$^{-۱۰}$	ضریب انتشار مولکولی	
۸/۰۳ برابر	۸ برابر	٦٦ تا ۵۳۰	۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰	غلظت اولیه شیرابه	
۱/۱۱ برابر	٦ برابر	۵۳ تا ۵۹	۵ تا ۳۰	ارتفاع معادل شیرابه	ماسه سنگ
۱ برابر	٦ برابر	۵۷	۰/۱ تا ۰/٦	تخلخل سنگ	
بسیار زیاد	۷۲ برابر	۰ تا ۱۰۱۲	۵ تا ۳٦۰	زمان	
بسیار زیاد	۱٦ برابر	۰ تا ۸۲٤	۰/۵×۱۰$^{-۱۰}$ تا ۸/۰×۱۰$^{-۱۰}$	ضریب انتشار مولکولی	
۸ برابر	۸ برابر	۱٤ تا ۱۱۲	۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰	غلظت اولیه شیرابه	

خلاصه و نتیجه گیری

ضریب انتشار مولکولی یون کلر در نمونه‌های تهیه شده از سنگ مارن و ماسه سنگ از منطقه عمومی دفن زباله سابق ارومیه واقع در دامنه‌های کوه‌های الله‌اکبر شهرستان ارومیه با استفاده از دو روش انتشار مولکولی "از میان سنگ" و "به داخل سنگ" اندازه‌گیری شدند. متوسط این ضریب برای سنگ مارن **(m²/s)** ۲/٤۸×۱۰$^{-۱۰}$ و برای ماسه سنگ **(m²/s)** ۲/۵۵×۱۰$^{-۱۰}$ بدست آمد. پوکی مارن کمتر از ماسه سنگ لیکن دانسیته خشک مارن بیشتر از ماسه سنگ است و این دو پارامتر به نوعی تأثیر همدیگر را در ضریب انتشار مولکولی متعادل کرده و موجب گردید که ضریب انتشار مولکولی یون کلر در این دو نمونه سنگ تقریبا یکسان باشد. مقادیر ضریب انتشار مولکولی بدست آمده برای یون کلر برای دو نمونه سنگ در محدوده مقادیر گزارش شده برای سنگ‌های مشابه می‌باشد.

برای بررسی تأثیر پارامترهای دخیل در انتشار مولکولی در سنگ، آنالیز حساسیت پارامترها با استفاده از محاسبات نظری توسط کد کامپیوتری Pollute انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که تأثیر پارامترهای زمان و ضریب انتشار مولکولی در هر دو سنگ از سایر پارامترها بیشتر است.

تطابق خوب نتایج مشاهده‌ای آزمایشگاهی و مدل نظری، صحت روش‌های آزمایشگاهی و مدل نظری استفاده شده در این مطالعه را تایید کرد. از نتایج بدست آمده در این مطالعه برای محاسبات انتقال آلودگی در طراحی مدفن‌های مواد زائد جامد مستقر در نهشته‌های سنگی می‌توان استفاده کرد.

مراجع

1. Rowe, R.K., Quigley, R.M., Brachman, R.W.I., and Booker, J.R., "*Barrier systems for waste disposal* ", 2nd ed., Spon Press, London, UK, (2004).
2. Rowe, R.K. and Badv, K. "Chloride migration through clayey silt underlain by fine sand or silt", *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 1, pp. 60-68, (1996a).

3. Shackelford, C.D., and Daniel, D.E. "Diffusion in a saturated soil, II. Results for compacted clay", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, pp. 485-505, (1991).
4. Barone, F.S., Rowe, R.K., and Quegley, R.M., "Laboratory determination of chloride diffusion coefficient in an intact shale," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 2, pp. 177-184, (1989).
5. Barone, F.S., Rowe, R.K., and Quegley, R.M., "Estimination of chloride diffusion coefficient and tortuosity factor for mudstone," *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 7, pp. 1031-1046, (1992).
6. Cave, L., Al, T., Xiang, Y., and Vilks, P. "A technique for estimating one-dimensional diffusion coefficients in low-permeability sedimentary rock using X-ray radiography: Comparison with through-diffusion measurements," *Journal of Contaminant Hydrology,* Vol. 103, pp. 1-12, (2008).
7. Badv, K., and R. Abdolalizadeh, "A laboratory investigation on the hydraulic trap effect in minimizing chloride migration through silt", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, Vol. 28, No. B1, pp. 107-118, (2004).
8. Badv, K., and Mahooti, A. A. "Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil systems", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, Vol. 28, No. B5, pp. 559-572, (2004).
9. Badv, K., and Rowe, R. K., "Contaminant transport through a soil liner underlain by an unsaturated stone collection layer", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 416-430, (1996).
10. Badv, K., and Rowe, R. K., "Effect of Darcy flux on chloride movement through saturated or unsaturated silt, sand, gravel, and stone", *51st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, Canada, Vol. 1, pp. 173-179, (1998).
11. Badv, K. and Faridfard, M. R. "Laboratory determination of water retention and diffusion coefficient in unsaturated sand", *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 161, pp. 25-38, (2005).
12. Badv, K. and Mahooti, A. A. "Chloride transport in layered soil systems with hydraulic trap effect", *Environmental Technology*, Vol. 26, No. 8, pp. 885-897, (2005).
13. Rowe, R. K., and Badv, K. "Advective-diffusive contaminant migration in unsaturated coarse sand and fine gravel", *ASCE - Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 12, pp 965-975, (1996b).
14. Conca, J. L., and Wright, J., "Diffusion coefficients in gravel under unsaturated conditions", *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 5, 1055-1066, (1990).
15. Gillham, R., and Cherry, J. A., "Contaminant migration in saturated unconsolidated geologic deposits", *Recent Trends in Hydrogeology*, pp. 31-62, (1982).
16. Rowe R.K., and Booker J.R., "*POLLUTE v.6.*: 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil", Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada, ©, (1994).

17. Petijohn, F. J., Harper and Brothers, "*Sedimentary rocks*", NewYork, P. 410, (1957).

۱۸. مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار ، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک مرحله اول خط ۲ قطار شهری تبریز"، تبریز، (۱۳۸۷).

19. Carozzi, A., "Sedimentary petrography", Englewood Cliffs, Prentice Hall, N. J, (1993).

20. Grathwohl, P., "Diffusion in natural porous media: Contaminant transport, sorption desorption and dissolution kinetics", Kluwer Academic Publishers, Boston, (1998).

۲۱. داوری اصل، یاشار، "مطالعه انتشار آلودگی در سنگ مارن منطقه دفن زباله ارومیه"، پایان نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، (۱۳۹۰).

۲۲. بدو، کاظم، و داوری اصل، یاشار، "مطالعه آزمایشگاهی و نظری انتشار مولکولی یون کلر در سنگ مارن و ماسه سنگ"، نهمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، اردیبهشت (۱۳۹۱).